

# Halbleitertechnik auf neuen Wegen

Beneking, Heinz

Veröffentlicht in:  
Jahrbuch 1984 der Braunschweigischen  
Wissenschaftlichen Gesellschaft, S.103-109



Verlag Erich Goltze KG, Göttingen

## Halbleitertechnik auf neuen Wegen

Von **Heinz Beneking**, Aachen

Sehr geehrter Herr Präsident,  
meine sehr verehrten Damen und Herren!

Der Name Gauß weckt bei einem Naturwissenschaftler vielfältige Assoziationen. – Carl Friedrich Gauß hat im Leben des Ingenieurs und Physikers zumindest seit dessen Studium eine besondere Bedeutung, als die magnetische Induktion, physikalische Sätze und sogar ein Maßsystem nach ihm benannt wurden. Die Zeiten ändern sich, unser Maßsystem ist modifiziert, und der Fortschritt hat uns größere Einheiten nicht nur in der Pferdestärke unserer Autos beschert, sondern auch in der Physik – ein Tesla = 10.000 Gauß.

Der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft möchte ich ganz besonders dafür danken, daß sie mich als Träger der Gauß-Medaille ausersehen hat und damit zu einem Bewahrer des Bewußtseins gemacht hat, daß Carl-Friedrich Gauß einer der ganz großen deutschen Wissenschaftler war. Ein Naturwissenschaftler, der selbst sein Streben durch ein Zitat aus Shakespeare „König Lear“ umriß:

Thou, nature, art my goddess;  
to thy law my services are bound.

Dies tat Gauß, und die mit einem solchen Einsatz verbundene intellektuelle Freude und Befriedigung spürt wohl jeder echte Wissenschaftler, sowohl in der reinen Wissenschaft, als auch in der angewandten, im technischen Bereich.

Ob sich Gauß der Halbleitertechnik gewidmet hätte, ist eine müßige Frage. Die Arbeit von Ferdinand von Braun über die Leitung der Schwefelmetalle erschien in Pogendorfs Annalen erst zwanzig Jahre nach Gauß' Tod. Die Astronomie brachte ihn von der Mathematik zum Makrokosmos, und er wurde durch seine bahnbrechenden Arbeiten zum Lauf der Gestirne ein ebenso berühmter Astronom, wie er durch seine mathematischen Arbeiten ein berühmter Mathematiker war.

Die Halbleitertechnik kommt von den Grundlagen der Festkörperphysik zum Mikrokosmos, und auch hier ist eine Gesamtschau erforderlich, welche viele Disziplinen umfaßt. Grundlagen und Anwendungen sind vielfältig verwoben, die Quantentheorie geht eine fruchtbare Symbiose mit grobschlächtiger Elektronik ein, die Technologie, die Herstellkunst, wird zur kaum mehr erfüllbaren Anforderung an den Ingenieur, stellt höchste Ansprüche an ihre wissenschaftliche Durchdringung, an Prozeßführung und Reproduzierbarkeit.

Es fing so einfach an, Hilsch und Pohl bauten 1938 in Göttingen ihren Kristallverstärker, bei dem man mit bloßem Auge das Vordringen der Ladungswolke durch die Umladung von Farbzentren verfolgen konnte. 1948 wurde von Bardeen und Brattain

durch einen Artefakt die Minoritäteninjektion entdeckt, Shockley erfand den Flächen-transistor.

Die Silizium-Planartechnik Anfang der 60er Jahre führte dann zur monolithischen Integration, wobei die 1962 von Kahng eingeführten MOS-Transistoren eine wichtige Rolle spielen.

1 Mio. Bauelemente pro Chip ist heutiger Standard, 1 Mio. funktionierende und miteinander kommunizierende Bauelemente wohlgemerkt. Die staunende Umwelt erfährt täglich von neuen Produkten der Halbleiterindustrie. Wir stehen in der dritten industriellen Revolution nach der Einführung des automatischen Webstuhls und der Dampfmaschine. Doch dies, meine Damen und Herren, betrifft eine zwar konsequente und rasante und auch beeindruckende, aber doch nur konventionelle Entwicklung, nachvollziehbar mit der Textbuch-Physik der 30er Jahre.

Tatsächlich revolutionierend sind die Entwicklungen der letzten fünf Jahre. Realisierte Übergitter, Superlattices, wie wir in deutsch sagen, modulationsdotierte und Quantenwall-Strukturen, sowie das Eindringen der Submikron-Technik in die Bauelement-Technologie. Damit wird tatsächlich ein neues Blatt in der Entwicklung der Halbleitertechnik beschrieben. Eines, das gelesen und verstanden werden kann nur mit dem Wissen um jüngste physikalische Erkenntnisse und betrieben werden kann allein von breit ausgebildeten, die Quantentheorie ebenso beherrschenden wie technologisches Fingerspitzengefühl besitzenden Fachleuten in der Kooperation von Theoretikern und anwendungsbezogenen Ingenieuren.

Welche Phänomene sind es nun, die die neue Halbleiterära einleiten. Von Heteroverbindungen wurde bereits von Herrn Professor Krömer am Vormittag berichtet. Auf diesen wesentlichen Teilaspekt werde ich im folgenden nicht mehr eingehen. Was ich hier nennen möchte, ist die Möglichkeit der Modulationsdotierung. Sie führt zu einer ganz neuen Klasse von Bauelementen, deren Bedeutung nicht hoch genug eingeschätzt werden kann. Wir verstehen darunter die Schaffung extrem dünner hochkontrdotierter Zonen in einem Halbleiter-Einkristall. Lassen wir die Realisation zunächst beiseite und fragen nach der Wirkung. Extrem dünn heißt größenordnungsmäßig maximal 10 nm,  $\frac{1}{100} \mu\text{m}$ ; kontrdotiert heißt, in einem elektronenleitenden Material diese Zone mit Akzeptoren zu versetzen mit einer Dichte um  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  oder höher.

Was geschieht, wenn eine solche Zone eingebettet wird in einen schwach n-dotierten Halbleiter. Es handelt sich offenbar um eine transistorartige Struktur, Emitter n, Basis p, Kollektor p, npn-, aber mit einem gravierenden Unterschied. Die eigentliche, neutrale Basis ist wegen der Dünne der Schicht verschwunden, die Zwischenschicht ist von beweglichen Trägern entblößt und stellt mit ihren Dotierungsrümpfen eine negativ geladene Flächenladungsscheibe dar. Dies Entblößen ist bedingt durch die geringe Schichtdicke, die viel kleiner ist als die zugehörige Debye-Länge. Die entsprechenden positiven Ladungen finden sich am Rande der hochdotierten n-Zonen, welche beidseitig an das System anschließen.

Stellen Sie sich dies plastisch vor: Hier links eine positive Ladung, dann nichts, hier jetzt eine hohe negative Ladung, und dann wieder nichts, und schließlich wieder eine positive Ladung. Insgesamt herrscht Neutralität, aber die räumlich voneinander ent-

fernten Ladungen bewirken ein elektrisches Feld, wie in einem Plattenkondensator. Die Elektrostatik ist schnell klar: Wir haben gemäß des Vorschlages von Roger Malik, den er in seiner Dissertation 1980 realisiert hat, eine Dreiecksbarriere geschaffen – eine Potentialbarriere für Majoritätsträger.

Ist sie symmetrisch angeordnet, erhalten wir eine symmetrische Stromspannungskennlinie, mit gleichem Verhalten unabhängig von der Richtung der angelegten Spannung. Liegt die Barriere jedoch unsymmetrisch, erhalten wir eine unsymmetrische Potentialschwelle mit unsymmetrischem Stromfluß bei anliegender Spannung. Wir können nicht nur die Barriere in ihrer Höhe durch die Dotierung gezielt beeinflussen, sondern die für beide Stromrichtungen unterschiedlichen Stromverläufe durch die räumliche Lage der inneren Ladungsscheibe beeinflussen. Für die Anwendung ist wesentlich und bedeutsam, daß hierbei Majoritätsträger, in unserem Beispiel Elektronen, einfließen werden. Das ist etwas neues. Man kannte zuvor doch nur Boltzmann-Barrieren zur Steuerung von Minoritätsträgern, was gekoppelt ist mit deren langsamer Bewegung und ihrer Speicherung und damit der großen Diffusionszeitkonstanten der bipolaren Bauelemente. Hier und jetzt hat man es nun nur noch mit der Relaxationszeitkonstanten zu tun, welche viel kürzer sind als die Diffusionszeitkonstante. Es treten auch keine Arbeitspunkt-abhängigen Kapazitäten auf, denn die Ladungen verbleiben spannungsunabhängig an ihrem Ort. Die thermische Emission statt einer Minoritäten-Injektion bestimmt das Bauelemente-Verhalten.

Verwendet man eine stark unsymmetrische Anordnung in einer auf Shannon zurückgehenden Form, erhält man eine Konfiguration, die voll einer Schottky-Diode entspricht, also einer Metall-Halbleiter-Anordnung, wie wir sie im Höchstfrequenzgebiet verwenden. Die sich ergebende Potentialverteilung ähnelt einem Kamelhöcker, und weil das Material wie ein Kamel störrisch ist, bei den Herstellversuchen die gewünschte Charakteristik zu zeigen, hat Shannon als echter Engländer das Wort Camel-Diode, Kamel-Diode, dafür geprägt. Die oft apostrophierte Duplizität der Fälle tritt übrigens an dieser Stelle auf. Praktisch gleichzeitig hat Herr Mader in München diese Idee gehabt, wenn auch von einer anderen Seite her, und zugehörnde Patente gehören nun in einem Land dem Einen, im anderen dem Anderen beziehungsweise ihren Firmen Mullard/Philips und Siemens.

Was hat man damit gewonnen. Man besitzt eine Struktur, die wie eine Schottky-Diode arbeitet, mit all ihren Vorteilen bezüglich Schaltgeschwindigkeit und Hochfrequenzverhalten. Im Gegensatz zu dieser ist die eigentliche Funktion jedoch innerhalb eines einkristallinen Halbleiterbereichs angesiedelt, ohne die kritische Metall-Halbleiter-Grenzfläche. Dies ist nun äußerst bedeutsam. Die Barrierenhöhe, also die Schwelle, welche energetisch von den Trägern überwunden werden muß, ist vorgebar, die Kapazität ist praktisch spannungsunabhängig, und das Fehlen von Zwischenschichtzuständen, wie wir sie bei der Schottky-Diode an der Grenzschicht Halbleiter–Metall immer haben, läßt ein niedriges ( $1/f$ )-Rauschen erwarten. Die Barriere ist ja hier perfekt eingepackt, wie bei einem Bipolarsystem, und liegt nicht frei an der Oberfläche. Hinzu kommt, daß dies System in Silizium ebensogut aufzubauen ist, wie in GaAs und anderen III-V-Materialien, die bei konventionellen Bauelementen insbesondere für

Anwendungen bei höchsten Frequenzen prädestiniert sind. Ja sogar besser als diese Materialien könnte Silizium geeignet sein, da es bei dieser neuen Klasse von Bauelementen auf spezielle Dotierungseigenschaften ankommt, welche beim Silizium möglicherweise besser zu realisieren sind als bei III-V-Verbindungen.

Nun kann man nicht nur Dioden, sondern ähnlich dem Übergang von der pn-Diode zum bipolaren Transistor auch durch eine enge Kopplung zweier Kamel-Dioden, oder – wie Herr Mader sie nennt – von Bulk-Barrier-Dioden, auch Majoritätsträger-Transistoren bauen. Das heißt, die Verwirklichung eines Hot-Electron-Transistors kommt greifbar nahe. Dies gelingt allerdings nur bei extrem inniger Kopplung der Substrukturen, innere Abstände der Größenordnung 10 nm sind hier erforderlich. Es ist dies eine nicht gerade geringe Anforderung an die Technologie von Mehrschicht-Strukturen, aber ein lohnendes Ziel. Wie Sie wissen, sind Schichtfolgen dieser Größenordnung mit modernen Epitaxieverfahren durchaus realisierbar. Heiße Elektronen müssen dann kollisionsfrei diese innere Verbindungsstrecke der beiden Cameldioden durchlaufen – physikalisch wie technisch äußerst reizvoll und spannend. Der Begriff „happy-electrons“ hat sich für solche Ladungsträger eingebürgert, denen es gelingt, tatsächlich ohne wesentlichen Verlust an Energie entsprechend dünne Halbleiterschichten zu durchlaufen und damit einen Bipolartransistor-ähnlichen Majoritäten-Transistor zu kreieren. 100 GHz sollte keine Grenze für eine solche Konfiguration sein – wenn's mal gelingt. Als Diode, das kann man voraussagen, wird dieses System auf jeden Fall in Kürze konventionelle Bauelemente verdrängen.

Von Herrn Krömer haben Sie heute vormittag die Molekularstrahl-Epitaxie loben gehört; dort hat der Physiker gesprochen, und in der Tat sind die Erfolge der MBE beeindruckend. Der Ingenieur hat gewisse Vorbehalte, er benötigt beste Reproduzierbarkeit, ein preiswertes Verfahren und einen hohen Durchsatz. Er sucht Alternativen für das doch sehr teure und physikalische Molekularstrahl-Epitaxieverfahren. Er läßt die ihm bekannten Verfahren Revue passieren, ausgerichtet auf die neue Technologie der vertikalen Submikronstrukturierung, praktisch zwei Größenordnungen feiner als bisher üblich. Und er findet Möglichkeiten. Die Ionenimplantation ist ihm vertraut, hat aber zwei drawbacks. Die eine Schwierigkeit ist in der Dichteverteilung implantierter Spezies begründet, welche eine relativ flache, Gauß-förmige ist – an dieser Stelle lieben wir somit Gauß nicht so sehr –, die zweite ist das Erfordernis der Ausheilung, damit die eingeschlossenen Ionen auf normale Gitterplätze rutschen und ihre Dotierungsfähigkeit ohne Störung der Trägerbewegung der Elektronen im Kristall wahrnehmen können. Die erforderlichen Zeiten und Temperaturen sind zu lang und hoch für die neuen Anforderungen, da eine starke Profilverfälschung und damit ein Verschmieren der Verteilung eintritt. Was können wir dagegen tun. Erstens implantieren wir durch eine Deckschicht, womit wir erreichen, daß nur der Schwanz der Verteilung im eigentlichen Material auftritt, zweitens heilen wir mittels eines Kurzzeit-Temperaturchocks aus (Flash-Annealing), und wir haben überdies das Gitter im Implantationsbereich voramorphisiert, um ein Auswandern der Spezies zu verhindern. Es funktioniert also zumindest im Labor, eine Zehnerpotenz Dotierungsabfall pro 10 nm.

Das Überwachsen mit einer weiteren Schicht muß dann schnell und bei möglichst niedriger Temperatur erfolgen. Hier bietet sich das Verfahren der metallorganischen Epitaxie an. Metallorganische Komponenten müssen dann gecrackt werden, und dies in Gegenwart von Atomgruppen, welche gemeinsam mit dem Metallatom der organischen Verbindung das Kristallgitter aufbauen können. Im Falle von GaAs also etwa Arsin, wobei als metallorganische Komponente Trimethyl-Gallium Verwendung finden kann. Um nun eine möglichst dünne Schicht in möglichst kurzer Zeit aufbringen zu können, kann man eine pulsförmige Temperaturerhöhung mittels eines Lasers heranziehen, das heißt, man kann eine Laser-unterstützte Pyrolyse durchführen. Verwendet man dazu einen Puls laser mit einer Pulsdauer von einigen Nanosekunden und einer Wellenlänge, welche primär eine Temperaturerhöhung durch Absorption der Strahlung in der obersten Oberfläche des Substrates bewirkt und weniger eine photolytische Zersetzung der Komponenten, wird es möglich, lediglich aus dem Adsorbat auf der Halbleiteroberfläche heraus ein Schichtwachstum vorzunehmen. Drei Atomlagen pro Schuß- und Halbleitertechnik auf dem Wege zum technologischen Atomical Configuration Engineering, in gleicher Weise, wie heute vormittag von Herrn Professor Krömer bezüglich des Aufbaus von Grenzschicht-Strukturen erläutert. Doch nicht nur wachsen, sondern auch dotieren können wir auf diese Weise: Pro Laserschuß ist eine 5 nm dicke Oberflächenschicht bis zur Entartung dotierbar, mehr Schüsse ergeben tiefergehende Profile. Falls wir wollen, können wir so per optischer Abbildung in beliebiger Konfiguration auf der Halbleiterscheibe ohne Maskierung dotieren. Ein Einbau von Dotierstoffen findet nur an den belichteten Stellen statt; laterale Auflösung unterhalb von 1  $\mu\text{m}$ . Neue Verfahren werden so machbar, die für neuartige Bauelemente unabdingbar sind und die auf technologischem Gebiet in den kommenden Jahren eine große Umwälzung bedeuten werden. Es erfolgt der Übergang von der statischen Technologie zur dynamischen mit transients Materialbeeinflussung.

Mit diesem Exkurs in die neue zukunfts-trächtige Gruppe der Majoritätsträgerstrukturen habe ich Ihnen einen Ausschnitt aus der Entwicklung der vertikalen Strukturierung vorgeführt. Die neuen Wege der Halbleitertechnik gehen aber nicht nur in die Tiefe, sondern auch in die Breite, wobei das Wort Breite allerdings übertrieben ist. Aktive Geometrien, also die Strukturbreiten von Bauelement-Substrukturen, welche für die Funktion wesentlich sind, liegen heute schon bei 0,5  $\mu\text{m}$ , und wir wollen noch schmaler werden. Dies an sich ist nicht so schlimm, kritisch ist die jeweilige Justierung: Es muß ja eine Schicht über die andere passen, die Justierung muß verständlicherweise wesentlich geringere Schwankungsbreiten einhalten als die zu justierende Struktur selbst groß ist. Mehrere Verfahren konkurrieren bezüglich einer solchen lateralen Strukturübertragung. Mit und ohne Maske, mit und ohne Resist, also einer durch die zur Konfigurierung verwendete Strahlung modifizierbaren Deckschicht.

Gleichwie die schließliche technische Lösung aussehen wird, es gelingt im Labor heute bis herab zu etwa 20 nm Strukturen gewollt zu erzeugen, und dies bei einer Überlagerungsgenauigkeit von etwa 5 nm. Man verwendet hierzu die Elektronenstrahl-Lithographie. Strukturen der gewünschten Feinheit wurden schon früh durch thermische Einwirkung des Elektronenstrahls auf eine dünne Folie hergestellt, nicht aber

gemäß den Forderungen der Halbleitertechnik. Das Problem besteht in dreierlei Hinsicht. Das erste betrifft die bei der Abbremsung des Elektronenstrahls auftretende Streuung der Elektronen. Es entsteht ein Halo, was uns aber im Gegensatz zum Halo des Mondes am Firmament – Sie sehen meinen Versuch, auch die moderne Technologie auf Gauß zu beziehen – die laterale Auflösung begrenzt. Abhilfe schafft eine hohe Elektronenenergie, wir nehmen 100 kV als Beschleunigungsspannung, dann flutschen die Elektronen zunächst noch ungestört durch die obere Materiallage hindurch, ehe sie gestreut werden, und 10 nm-Strukturen werden machbar. Das zweite Problem besteht in der korrekten Strahlführung zum Schreiben auf der Substrat-Oberfläche bzw. in der Resist-Schicht. Hierzu haben wir einen Patterngenerator gebaut, welcher ein Ansteuerungsraster von 3 nm besitzt. Dies ist auch der Durchmesser des Gaußschen Strahls – diesmal habe ich nicht krampfhaft nach einem Bezug gesucht, man sagt wirklich so –, so daß das dritte Problem, das der Justierung in eben dieser Genauigkeit lösbar werden dürfte.

Unterhalb  $0,5\ \mu\text{m}$  nun treten neuartige Phänomene auf, die für Physiker und Ingenieure gleichermaßen von Interesse sind, und die die Auffassung ad absurdum führen, die Festkörperphysik hätte ihre Blütezeit hinter sich. Wir kommen in Längenbereiche hinein, die 10 Atome umfassen, in Strukturgrößen, längs deren das ballistische Verhalten der Elektronen erkennbar – und wie wir glauben – ausnutzbar wird.

Sie alle kennen das Ohmsche Gesetz, wir haben es auf der Schule gelernt, das heißt, wir schon, aber heute ist es nicht so sicher, ob es zum Kenntnisstand eines jeden Abiturienten gehört. Nun, physikalisch gesprochen, ist das Ohmsche Gesetz die Proportionalität von elektrischer Stromdichte und anliegender elektrischer Feldstärke. Dies Gesetz, meines Erachtens tatsächlich das schwierigste der Elektrotechnik, basiert auf der Wechselwirkung der einzelnen bewegten Elektronen mit dem Kristallgitter, und sagt etwas Bestimmtes über die Eigenschaften des Ensembles dieser Elektronen aus. Nun ist es aber so, daß eine solche Wechselwirkung einer minimalen Schwellenenergie, der der ersten anregbaren Gitterschwingung, der longitudinalen Phononen, bedarf und daß eine Relaxationszeit auch für den Impulstransfer anzusetzen ist. Beides führt nun dazu, daß im ersten Augenblick einer angreifenden Kraft, also des elektrischen Feldes, ein Überspringen erfolgt derart, daß für Bruchteile einer pico-Sekunde eine Geschwindigkeit erreicht wird, welche eine Größenordnung höher als der stationäre Maximalwert ist. Etwa  $10^8\ \text{cm/sec}$  bei uns verfügbaren Materialien, das sind 0,3 Prozent der Vakuumlichtgeschwindigkeit. Die Strecke nun, die währenddessen das Elektron durchläuft, beträgt bei den gängigen III-V-Halbleitern gerade etwas unterhalb  $0,5\ \mu\text{m}$ . Bei Silizium ist diese Strecke leider wesentlich kürzer und liegt damit außerhalb des derzeit technisch Machbaren. Das heißt aber, daß bei entsprechend kurzen Kanälen überproportional zur Verkürzung der Geometrie die Schaltzeiten geringer werden und die obere Grenzfrequenz ansteigen sollte. Erste Meßergebnisse scheinen die Voraussage tatsächlich zu bestätigen, und Sie werden verstehen, daß gerade diese Gründe wesentlich für das Bemühen um diese feinen Geometrien sind, und nicht nur die erwartete höhere Packungsdichte bei integrierten Schaltungen. Deren Verkleinerung führt allerdings auch zu beeindruckenden Zahlen.

Heutige Strukturbreiten betragen  $2\text{ }\mu\text{m}$ . 20 nm sind 1 Prozent davon. Damit würde eine konsequente Ausnutzung der gegebenen Verkleinerungsmöglichkeiten zu einer weiteren Erhöhung der Packungsdichte um den Faktor 10000 führen. Kommen wir an unser Gehirn heran?! Unser Geist ist nicht in der Lage, die hierin liegenden Möglichkeiten zu erfassen. Das einzige, was die Halbleiter-Leute zu projizieren vermögen, ist der Bau immer komplexerer Speicher. 256 K haben wir, 1 Mbit, 2 Mbit, 4 Mbit sind angestrebt – 4 Gbit wären möglich.

Doch wie stets im Leben, man erhält nichts geschenkt ohne Gegenleistung. Sie sehen es schon an mir, der ich gerade mit Freude die Gauß-Medaille erhalten habe, und nun stehe ich umgehend schon hier, um Ihnen einen Vortrag zu halten. Und das noch ohne Lichtbilder, weil man im Mittelalter so wenig vorausschauend war, für diese Kommunikationstechnik Raum vorzusehen. Bei den feinen Geometrien nun tragen absolut sehr geringe Elektronenmengen zum Geschehen bei,  $Q = C \cdot V$ , die Ladung ist Kapazität  $\times$  Spannung, eine zweite Grundbeziehung der Elektrotechnik. Die innere Kapazität der winzigen Elemente ist nun sehr klein, einige Attifarad, ein Attifarad ist ein Millionstel Picofarad. Damit entspricht der Ladung eines einzigen Elektrons bereits eine Spannung von einigen Millivolt, und dies heißt konkret, daß solch kleine MOS-Transistoren mit ihren Fangstellen untolerierbare Schwellspannungsänderungen aufweisen, denn die Fangstellenbesetzung erfolgt statistisch, und jedesmal würde der Strom einen Sprung machen, wie er der entsprechenden Spannungsänderung zukommt. Nur extrem niedrige Betriebsspannungen könnten dies verhindern.

Wir sehen, es ist wie im Paradies, Eva hält uns den Apfel hin, und wir werden in die rauhe Wirklichkeit hineingestoßen, wenn wir ihn ergreifen. Kein Physiker aber, der nicht Adam wäre, und kein Ingenieur, der nicht einen Trick versuchen würde, um um das Schlimmste herumzukommen. Genau diese Aufgabe steht jetzt vor uns, Einsicht in die wirksamen Phänomene zu gewinnen, und diese umzumünzen in reale Bauelemente. Eine Aufgabe, die wir freudig ergreifen im Sinne von Carl-Friedrich Gauß

Du Natur bist meine Gottheit  
deinen Gesetzen diene ich

Meine Damen und Herren, herzlichen Dank für Ihr Zuhören.